

Egy dimenziós hidrodinamikai modell fejlesztése a Tisza hazai szakaszára

Liptay Zoltán Árpád

Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Vízudományi Kar, 6500 Baja, Bajcsy-Zsilinszky u. 12-14.
(e-mail: liptay.zoltan.arpad@uni-nke.hu)

DOI: 10.59258/hk.15074



Kivonat

Az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) keretében működő Országos Vízjelző Szolgálat (OVSZ) 2020 januárjában helyezte üzembe saját fejlesztésű 1 dimenziós hidrodinamikai modelljét a Duna hazai szakaszára és a 2023 év elejére elkészült a Tisza modellje is. A cél az évtizedek óta használatban lévő kaszkádmodell (DLCM) támogatása egy hidrodinamikai alapú megközelítéssel, ami pontosabb előrejelzés alapja lehet. Az elkészült modell tartalmazza a Tiszát Tiszabecstől Törökbecséig (Novi Bečej), valamint a mellék-vízfolyásainak hazai szakaszát, és folyamatban van a külföldi folyószakaszokra történő adatgyűjtés és kiépítés. A Tisza vízgyűjtő hidrológiája komplex, emiatt különböző szakaszain egyidejű tetőzések alakulnak ki. Ennek oka többek között, hogy mellékvízfolyásainak vízjátéka igen nagy és akár egy időben is számottevő vízhozamot hozhatnak részvízgyűjtőikről. A vízrendszer természetes lefolyási viszonyai a vízlépcsők hatására megváltoztak, így mind a mellékág torkolatok környéki, mind pedig a vízlépcsők feletti duzzasztott szakaszok figyelembe vétele szükséges az árhullámok megfelelő transzformációjához. Ez magával hozza a vízszintszabályozó műtárgyak helyes leképezését olyan hidraulikai egyenletek formájában, amelyek behelyettesíthetők a Saint Venant egyenletekből álló egyenletrendszerbe. A tanulmányban bemutatjuk a modell felépítését, a modellépítés során felmerült nehézségeket, az elért eredményeket, azok összehasonlítását a Tisza-völgyi Árvízvédelmi Elemző Központ HEC-RAS modelljének eredményeivel, valamint az OVSZ által kiadott előrejelzésekkel és szimulációs eredményekkel. Részletezzük azokat a kihívásokat, melyekkel egy ilyen modell operatív használata során szembesül az előrejelző.

Kulcsszavak

Hidrológia, hidrodinamika, 1D, modellezés, Tisza, előrejelzés.

1D hydrodynamic modelling on River Tisza: challenges, results, difficulties

Abstract

The Hungarian Hydrological Forecasting Service (HHFS) operating within the framework of the National Water Directorate General has been operating a tailor-made 1 dimensional hydrodynamic model on River Danube since January 2020, while developing the model onto River Tisza, which was completed by the beginning of 2023 as well. The main objective of the development is to support and substitute the already running discrete linear cascade models (DLCM). The model contains the Tisza between Tiszabecs and Novi Bečej and all the Hungarian reaches of the tributaries. Data collection and model building are still in process on the foreign river reaches. The Tisza catchment has a complex hydrology often causing multiple flood peaks simultaneously along the river. The tributaries have a highly dynamic regime and all of the subcatchments can release significant discharges at the same time. The natural conditions for flood propagation had been modified due to the hydropower plants thus backwater effect is a major factor at the hydraulic structures and at the confluences. Modelling such structures requires the substitution of the Saint Venant equations with the basic hydraulic formulas. In this paper I present the building process of the model, the challenges I had to face and the achieved results. The results are then compared to the results of a HEC-RAS based system (Tisza Valley Flood Protection Analysis Center), to the forecasts published by the HHFS, and also to the pure DLCM results.

Keywords

Hydrology, hydrodynamics, 1D, modelling, Tisza, forecast.

BEVEZETÉS

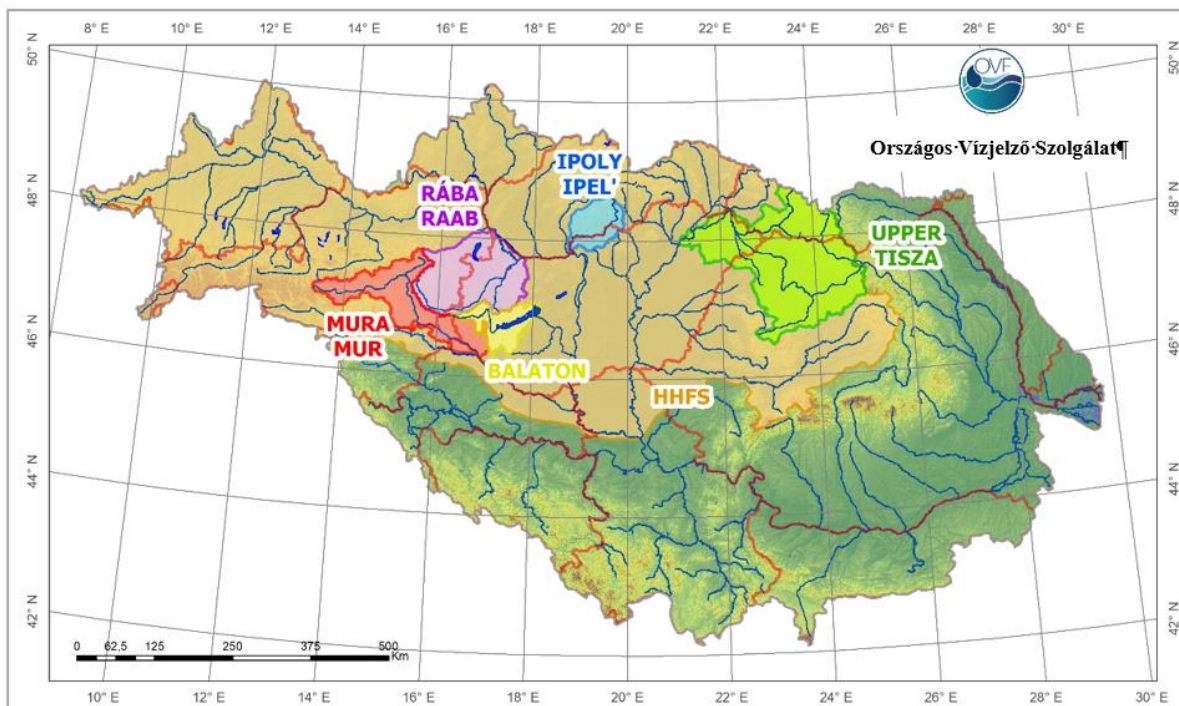
Az elmúlt években a nagyvizek előrejelzése mellett egyre fontosabb lett a kisvízi vízállások minél pontosabb előrejelzése is. Ezt a vízhiányos időszakok súlyosbodása, és egyre gyakoribb előfordulása indokolja (Stagge és társai 2017, Cammalleri és társai 2020, Lhotka és társai 2020). Egy hosszabb időelőny mellett is megbízható előrejelzéssel időben felismerhető a kockázat, és a védekezés tervezésével és végrehajtásával mérsékelhető a kár. Így a szakmai döntéshozás részéről mind gyakrabban elvárás a hazai hidrológiai előrejelző rendszereinkkel szemben a folyamatos üzem, a megbízható üzemelés és a kielégítő jóságú előrejelzés a vízjárás teljes tartományában. Ez az adott vízfolyás hidrológiai folyamatainak ismeretét, megfelelő adattelátottságot, és egy kellően kidolgozott előrejelző rendszert igényel. Napjainkban már az előrejelző rendszerek

igen széles spektrumon mozognak, sőt a mesterséges intelligencia eszköztárának kiaknázásával újabb és újabb távlatok nyílnak (Liptay 2022, Chang és társai 2023, Di Nunno és társai 2023, Nearing és társai 2023).

Hazánkban több valós idejű előrejelző rendszer üzemel, melyek különböző módszerekkel, más-más időelőnyvel jeleznek előre. Ezek a vízügyi igazgatóságok által üzemeltetett Rába, Mura, Ipoly, Felső-Tisza, és Balaton előrejelző rendszerek. A legnagyobb kiterjedésű az Országos Vízjelző Szolgálat (OVSZ) által fejlesztett és üzemeltetett OLSER rendszer (Országos Lefolyás Szimulációs és Előrejelző Rendszer) (1. ábra). Ez a rendszer a Duna Tisza torkolat feletti teljes vízgyűjtőjét lefedi, és 6 napos időelőnyvel, 6 órás időlépcsőkben szolgáltat vízállás és vízhozam előrejelzést a főbb hazai vízmércékre. Az OLSER-rel végzett számítások során a hidrológiai transzformáció

diszkrét lineáris kaszkádmóddal (DLCM) történik (Kalinin és Milyukov 1957, Nash 1960, Szöllősi-Nagy 1982, Szilágyi és Szöllősi-Nagy 2008, Szilágyi és Laurinyecz 2014), melynek előnyei a gyorsaság, a könnyű paraméterezhetőség, hátrányai pedig a merev modellszerkezet és a paraméterek függése az időlépcsőtől. A kaszkádmóddal rendkívül jól illeszthető a hazai folyókra, de mivel a vízhozamok transzformációját végzi, a vízállá-

sokat pedig utólag permanens módon számítjuk, így minden olyan esetben romlik a pontossága, amikor a vízfelszín esése jelentős szerepet játszik. A leggyakoribb ilyen esetek a duzzasztott vízterek, mint például a vízlépcsők felvizen lévő mércék, vagy a mellékvízfolyások torkolat közeli szakaszai. Ilyen mérceszelyvényekben a duzzasztott vízszint számítása utólagos korrekcióval történik.



1. ábra. Hazai hidrológiai előrejelző rendszerek
Figure 1. Hungarian hydrological forecasting systems

Az OLSER két alrendszerre tagolódik, a Duna és Tisza részmodellekre. A Tisza vízrendszerének több olyan jellegzetessége is van, ami nehezíti a kaszkádmóddal használatát, így a modell pontossága elmarad a Duna modelltől. Ilyenek például a vízszintszabályozó műtárgyak, a beduzzasztott folyótorkolatok, vagy akár az egyidejű, egymásra ható árhullámok levonulása. Az OLSER kiegészítéseként a 2020-as év januárjában üzembe állítottunk egy szintén saját fejlesztésű 1 dimen-

ziós (1D) hidrodinamikai modellt (Liptay és Gauzer 2021). A modell célja a kaszkádmóddal szemben egy pontosabb, hidrodinamikai alapú árhullám-transzformációs számítás, ami jelentősen növelheti az előrejelzés jóságát. A közel két és fél éven tapasztalatai alapján, a Dunán a két módszer közel azonos teljesítményt mutat (1. táblázat), az általuk számított előrejelzések négyzetes középhibája csak milliméterekben tér el, többnyire a kaszkádmóddal javára.

1. táblázat. A vízállás előrejelzés négyzetes középhibái Budapestenél a 2021, 2022, és 2023 években, 1-6 napos időelőnyre (cm)
Table 1. The RMSE (root mean square error) of water level forecast at Budapest in 2021, 2022, 2023 for 1-6 days of lead time (cm)

módszer	1 nap	2 nap	3 nap	4 nap	5 nap	6 nap
2021 (01.01.-12.31.)						
DLCM	4,479	12,54	21,11	27,08	31,84	35,23
1D	4,55	13,94	22,85	28,91	33,96	37,25
2022 (01.01.-12.31.)						
DLCM	3,526	9,388	14,15	20,54	25,75	28,99
1D	4,206	11,34	16,11	21,14	25,88	28,97
2023 (01.01.-05.02.)						
DLCM	3,633	9,787	18,08	25,06	29,57	31,94
1D	4,588	10,59	17,71	26,18	31,50	33,70

Az eltérés oka feltehetőleg a két módszer eltérő hibakorrekciója. Míg az 1D modell az előrejelzés időpontjában számolt hibát konstansként végig viszi a teljes időelőnyön, addig a kaszkádmóddal kifinomultabb korrekciós eljárásai változtat-

ják a hiba mértékét a vízjárás függvényében. Ezen eljárások áttemelése az 1D modellbe folyamatban van. Jelen tanulmány célja a Tisza modell építése során tapasztalt nehézségek és kihívások ismertetése, és az aktuális eredmények bemutatása.

ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

Alapegyenletek

Az OVSZ által fejlesztett 1 dimenziós hidrodinamikai modell a Saint Venant egyenletrendszer az implicit Preissmann séma Verwey-féle változtatásával diskretizálja, és végül a linearizált egyenletrendszert a double sweep módszerrel (Thomas-algoritmus vagy ingamódszer) oldja meg (Preissmann 1961, Abbott 1979, Cunge és társai 1980, Abbott és Basco 1989).

A folytonossági egyenlet ismert alakja:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

A dinamikai egyenlet:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + S_f + S_e \right) = 0 \quad (2)$$

Ahol h a vízmélység (m), Q a vízhozam (m^3/s), β a momentum korrekciós tényező (-), B a vízfelszín szélessége (m), A a nedvesített szelvényterület (m^2), ∂x a számítási keresztzelvények távolsága (m), ∂t az időlépés (s), g a nehézségi gyorsulás ($\approx 9.80665 \text{ m/s}^2$), S_0 a fenékesés (-), S_f a súrlódásból származó esés (-), S_e az energiavonal kontrakcióból és expanzióból származó esése (-), K a vízvezető-képesség (m^3/s), R a hidraulikus sugár (m), q a hozzáfolyás [$\text{m}^3/(\text{s m})$].

A vízvezető-képesség, a súrlódásból származó esés, és az energiavonal esése az alábbiak szerint írható fel:

$$K = kAR^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

$$S_f = \frac{Q|Q|}{K^2} \quad (4)$$

$$S_e = \frac{K_{ec} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2}{2g} \quad (5)$$

Ahol k a meder simasági együtthatója ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$) K_{ec} az expanziós vagy kontrakciós együttható (-).

A parciális deriváltak diskretizálása a Preissmann séma szerint:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \theta \frac{f_{i+1}^{j+1} - f_i^{j+1}}{\Delta x} + (1 - \theta) \frac{f_{i+1}^j - f_i^j}{\Delta x} \quad (6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx \psi \frac{f_{i+1}^{j+1} - f_i^j}{\Delta t} + (1 - \psi) \frac{f_{i+1}^{j+1} - f_{i+1}^j}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\bar{f} \approx \frac{\theta}{2} (f_{i+1}^{j+1} + f_i^{j+1}) + \frac{1-\theta}{2} (f_{i+1}^j + f_i^j) \quad (8)$$

Ahol θ és ψ súlyszámok (-), értékük 0 és 1 közötti.

„A számítási gyakorlati szempontok a folyami hidraulikában” témájú könyv társszerzője, Verwey a dinamikai egyenlet nemlineáris tagjainak kompakt és robosztus közelítését javasolta (Cunge és társai 1980). A konvektív gyorsulás az ő felírása szerint:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) \approx \beta \left[\theta \frac{Q_{i+1}^j \times Q_{i+1}^{j+1}}{\Delta x \cdot A_{i+1}^{j+1/2}} - (1 - \theta) \frac{Q_i^j \times Q_i^{j+1}}{\Delta x \cdot A_i^{j+1/2}} \right] \quad (9)$$

A fenéksúrlódás:

$$gA \frac{Q|Q|}{K^2} \approx g \left[\psi \cdot A_{i+1}^{j+1/2} \frac{Q_{i+1}^{j+1} |Q_{i+1}^j|}{(K_{i+1}^{j+1/2})^2} + (1 - \psi) \cdot A_i^{j+1/2} \frac{Q_i^{j+1} |Q_i^j|}{(K_i^{j+1/2})^2} \right] \quad (10)$$

A double sweep módszer egy széles körben elterjedt eljárás lineáris egyenletrendszerek megoldásához. A diskretizált alapegyenletünket átrendezzük úgy, hogy megkapjuk az ismeretlen pentadiagonális mátrixát ($Q_{i+1}^{j+1}, h_{i+1}^{j+1}, Q_i^{j+1}, h_i^{j+1}$), és az ismert változók vektorát ($Q_{i+1}^j, h_{i+1}^j, Q_i^j, h_i^j$). Általános vektoriális alakban a linearizált rendszer így írható fel:

$$\bar{P} \cdot \bar{F}_i^{j+1} = \bar{E}_i^j \quad (11)$$

Ahol $\bar{F}_i^{j+1} = \begin{bmatrix} Q_i \\ h_i \end{bmatrix}^{j+1}$ és $\bar{E}_i^j = \begin{bmatrix} E1_i \\ E2_i \end{bmatrix}$, \bar{P} az együtthatómátrix. A módszer két új egyenlet bevezetését igényli, ezek:

$$Q_i^{j+1} = F1_i h_i^{j+1} + G1_i \quad (12)$$

$$h_i^{j+1} = P1_i Q_{i+1}^{j+1} + Q1_i h_{i+1}^{j+1} + R1_i \quad (13)$$

Ahol $F1, G1, P1, Q1$, és $R1$ a linearizált együtthatókból származtatható rekurzív változók. A számítás minden részlete megtalálható Cunge és társai (1980) és Abbott és Basco (1989) munkáiban.

Az alapegyenletek megoldásán túl a modell számos kiegészítést tartalmaz, ezek például:

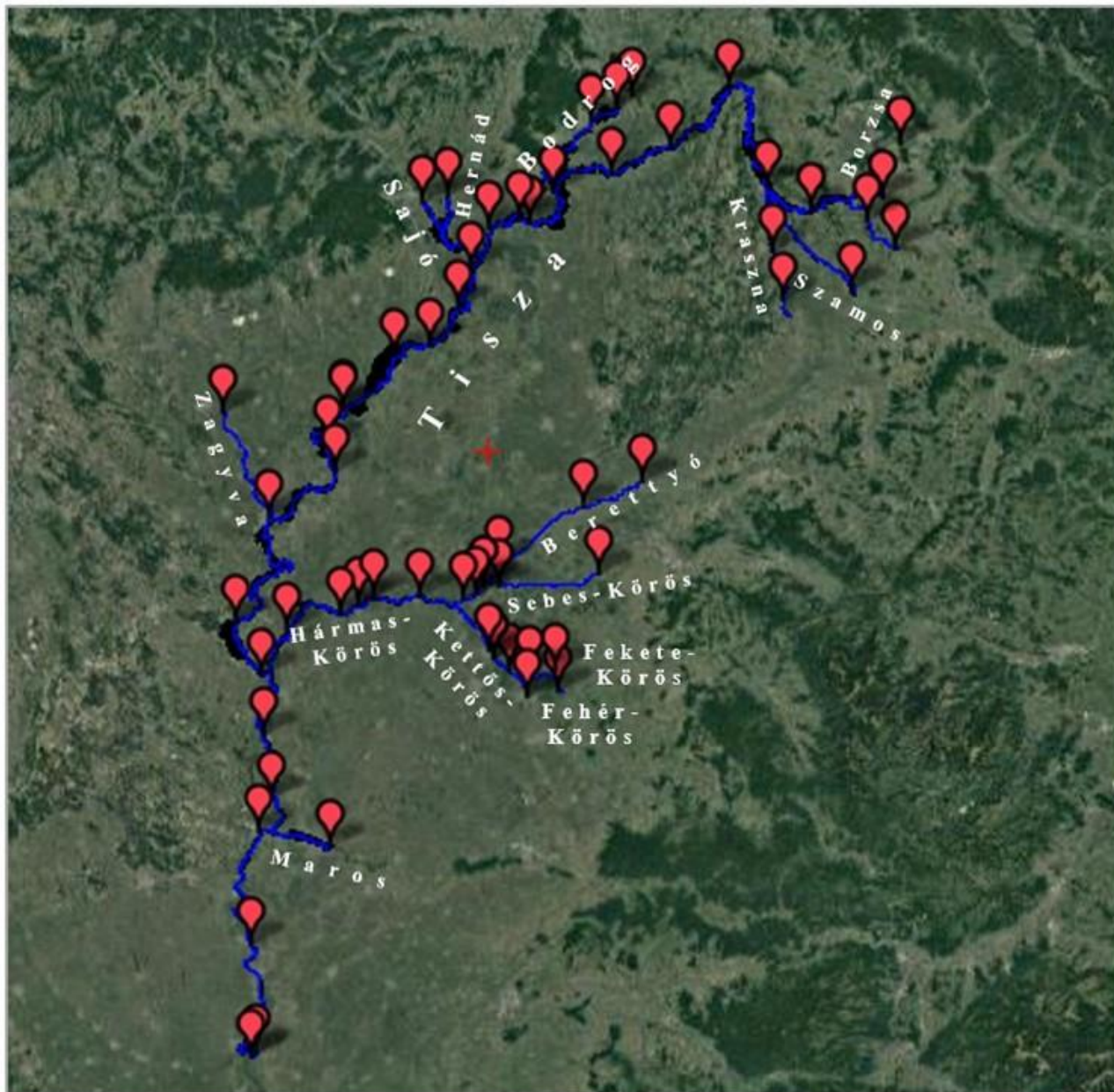
- a keresztzelvény adatok feldolgozása és kezelése,
- a komplex topológiák kezelése a csomóponti törvények segítségével,
- érdességek hosszirányú és vertikális változásának leírása,
- a kiszáradt meder kezelése szelvényterület megtartó Abbott-slot segítségével (Abbott és Basco 1989),
- a rohanó vízmozgás számítása a lokális parciális inercia módszerrel (Fread és Lewis 1998),
- a műtárgyak – h-ra és Q-ra való hatásának – számítása hidraulikai összefüggésekkel,
- a mért vízállás adatok hosszmentén folytonos asszimilációja és hibakorrekció,
- párhuzamos számítás többmagos számítógépeken,
- és autokalibrációs eljárás egy mesterséges neurális háló segítségével, ami az észlelések alapján számolt hibák és az érdességek közötti kapcsolat felállításával optimalizálja a modellt.

Felhasznált adatok

Az 1D hidrodinamikai modellnek két fajta adatszüksége van, egyik a keresztzelvények adatbázisa, a másik pedig egy vízrajzi adatbázis a mellékfeltételek előállításához. A keresztzelvények nyers adatai a Tisza-völgyi Árvízvédelmi Elemző Központ (TÁREK) rendszerében üzemelő HEC-RAS modelltől származnak, de ezek a feldolgozás során átesnek egy automatikus ellenőrzésen, ami kiválasztja az előírt sűrűségű szelvényeket, levágja a felesleges szelvényvegeket, kijelöli a középvízi meder határait, valamint a hullámtérhez tartozó átlagos szintet. A feldolgozási folyamat során előáll egy több dimenziós mátrix, amely szelvényenként tartalmazza a későbbi számításokhoz szükséges hidraulikai paramétereket 25 cm-es vertikális felosztással. Így az olyan egyszerű változók meghatározása, mint például a nedvesített szelvényterület, vagy a hidraulikus sugár, nem igényel összetett számítási műveletet, csak két érték kiolvasását a mátrixból és a köztük tör-

tendő lineáris interpolációt a tényleges vízszint alapján. Ez jelentős mértékben gyorsítja a számítási algoritmust, és

közben a vertikális egyszerűsítés gyakorlatilag nem ront az eredményeken.



2. ábra. A modellezett vízrendszer vázlatos helyszínrajza (piros jelölők: vízmércék)
Figure 2. The schematic overview of the model (red pins: gauging stations)

A modell a helyszínrajzi vonalvezetés megadását nem igényli, mert a keresztshelvények pontjainak koordinátáiból ábrázolni tudja a folyórendszert (2. ábra), az ágak kiosztását és a kapcsolódásukat a modellező a vezérlő fájlban definiálja. A Tisza modell jelenleg 4220 szelvényt tartalmaz, az átlagos számítási szelvénytávolság a Tiszán 100-200 méter, a mellékfolyókon 300-1000 méter. A modellezett vízrendszer az alábbi folyószakaszokat tartalmazza.

A modell a Tiszán Tiszabecstől a törökbecsei duzzasztóig tart és tartalmazza valamennyi lényeges mellékvízfolyás hazai szakaszát az országhatárhoz legközelebb eső magyar mérészselvényig. A lehetőleg ritkább szelvénykiosztás mellett az egyszerű modellszerkezet is azt a célt szolgálja, hogy a számítást minden esetben stabilan, – a

gyakorlatban elfogadható előrejelzési hibával – minél nagyobb időlépcsővel el lehessen végezni. Mivel nem esettanulmányról, hanem egy operatív használt eszközről van szó, így fontos kritérium a robusztusság és a számítási sebesség, mert több változat gyors kiértékelésére is lehet szükség egy-egy döntési helyzetben.

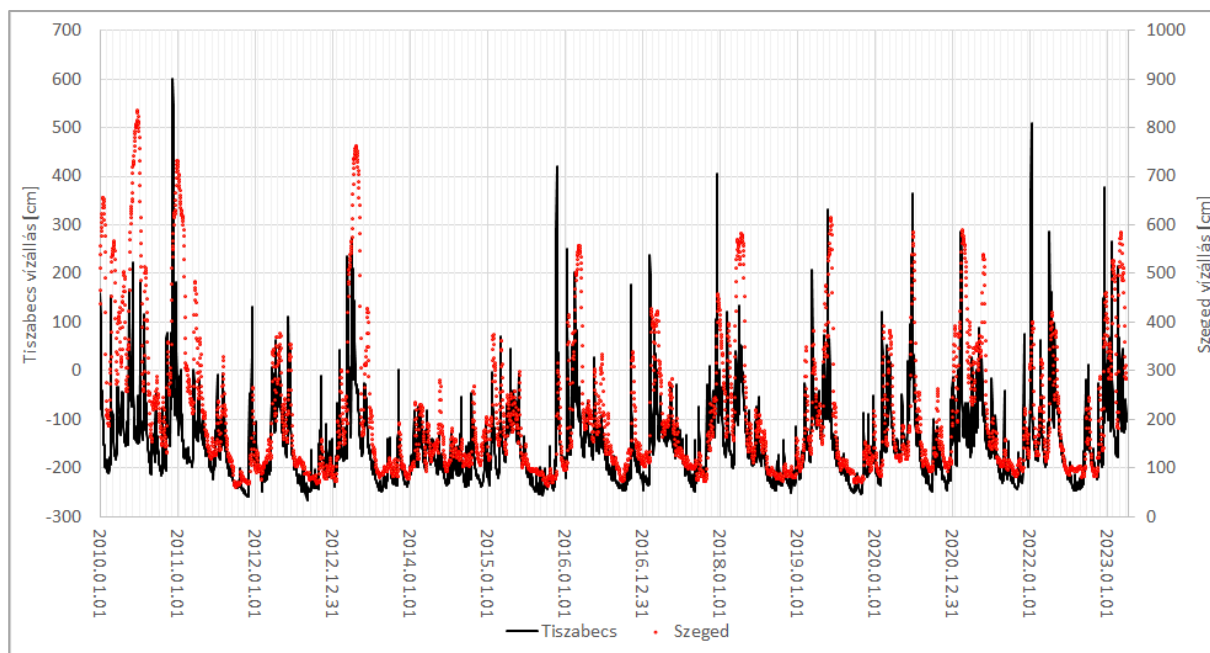
A vízrajzi adatok a modell számára közvetlenül hozzáférhetők, mert az OVSZ operatív adatokat tartalmazó bináris állományait eléri, így azokból 1994-től tud idősorokat kiolvasni. A modellépítés során 3 különálló időszakot vizsgáltunk: 2010. december, 2021. december, és egy hosszabb időszak több árhullámmal 2022. november 20-tól 2023. március végéig. Nem különböztettünk meg hagyományos értelemben vett kalibrációs és validációs időszakokat, mert az elmúlt 13 évben

(3. ábra) a vízgyűjtő az összetett hidrológiája miatt számos egymástól eltérő nagyvízi helyzetet teremtett, így valamennyi új

információt először a modell vízszint alapú igazolásához, majd további bearányításához használtunk fel.

2. táblázat. A modellezett vízrendszer szakaszai
Table 2. The modelled reaches

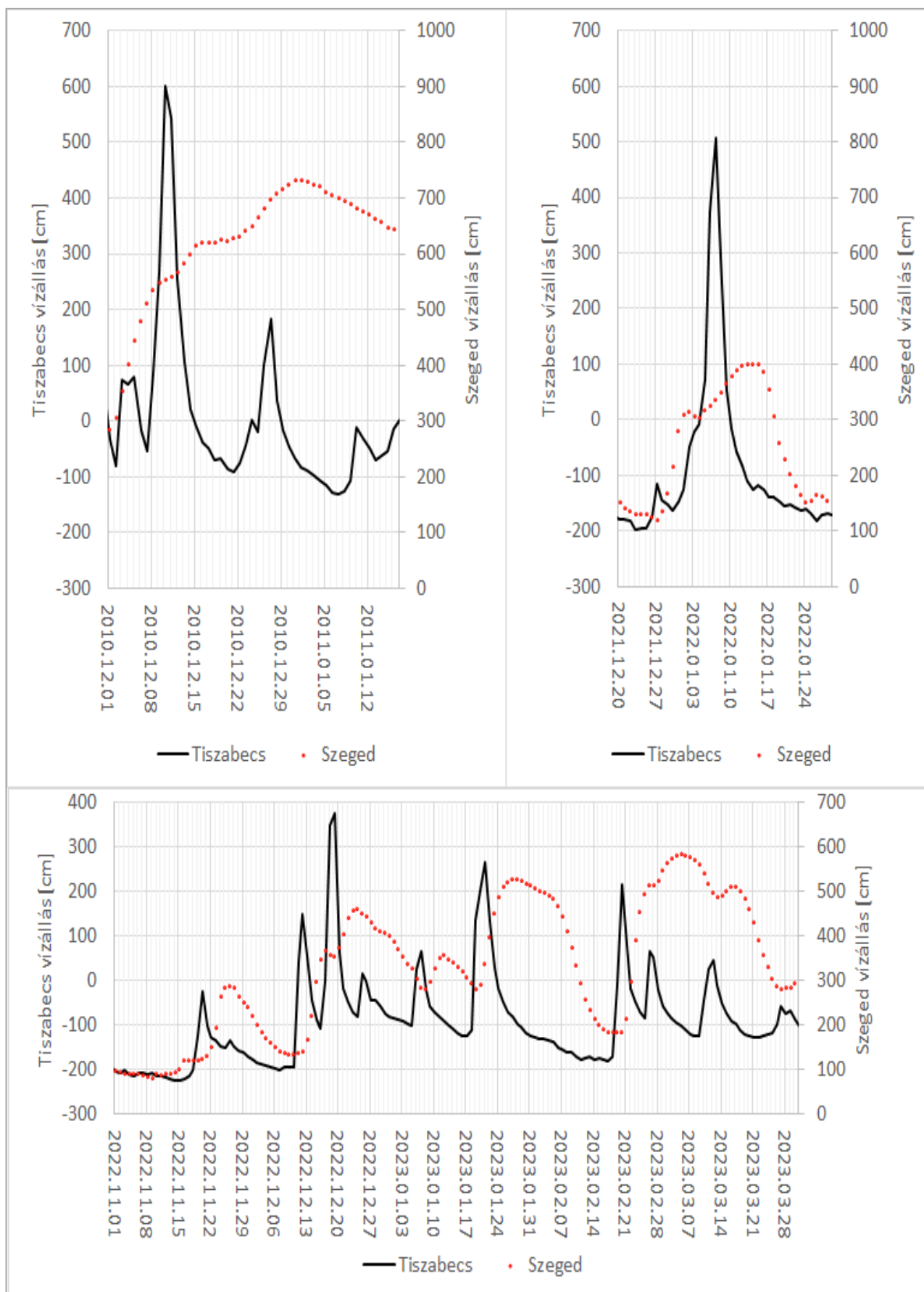
Sorszám	Név	fkm-től	fkm-ig	Sorszám	Név	fkm-től	fkm-ig
0	Tisza	727,2	744,3	15	Sajó	0	31,631
1	Borzsa	0,87	32,07	16	Tisza	437,594	492
2	Tisza	724,024	727,2	17	Tisza	335,706	437,594
3	Túr	0,089	29,808	18	Zagyva	0,06	54,947
4	Tisza	685,8	724,024	19	Tisza	243,395	335,706
5	Szamos	0,142	49,996	20	Berettyó	0,134	68,193
6	Tisza	682,4	685,8	21	Sebes-Körös	14,399	54,799
7	Kraszna	0,375	46,205	22	Sebes-Körös	0,102	14,399
8	Tisza	650,897	682,4	23	Fekete-Körös	0,094	20,4
9	Tisza	620	650,897	24	Fehér-Körös	0,149	4,796
10	Tisza	544,607	620	25	Kettős-Körös	0,096	37,316
11	Bodrog	0,88	47,74	26	Hármas-Körös	0,8	91,2
12	Tisza	492	544,607	27	Tisza	176,86	243,395
13	Sajó	31,631	51,172	28	Maros	0,076	24,5
14	Hernád	0,1	25,198	29	Tisza	61,728	176,86



3. ábra. A tiszabecsi és szegedi vízállások időszora 2010. január és 2023. március között
Figure 3. The time series of water levels at Tiszabecs and Szeged between January 2010 and March 2023

A három kiválasztott időszak vízállás idősorait az 4. ábra mutatja és ezen látható, hogy a magas tiszabecsi tetőző vízállás nem feltétlenül jelent magas szegedi tetőzést. A mellékvízfyólyások hatása számottevő. Ez a

2022-2023. időszakban a leglátványosabb, amikor a több egymás után levonuló árhullám egyre alacsonyabb tiszabecsi tetőzéséhez egyre magasabb szegedi tetőzés párosult.



4. ábra. A modell bearányosításához kiválasztott időszakok tiszabecsi és szegedi vízállásainak idősorai
 Figure 4. Water levels at Tiszabecs and Szeged in the periods selected for scaling the model

Műtárgyak

A Tisza hazai szakaszán a két nagy műtárgyunk, a Tiszalöki és a Kiskörei vízlépcső mellett, számos olyan építmény található, ami kisebb-nagyobb mértékben hatással van a lefolyási viszonyokra. Ezeket a keresztiszelvények a viszonylag nagy távolságuk miatt a Saint Venant egyenletekkel nem tudjuk leírni, így itt kiváltjuk az alapegyenleteinket egy egyszerűsített folytonossági egyenlettel, és a műtárgyhidraulika összefüggéseivel, azaz a bukó és zsilip képletek szabad és alulról befolyásolt eseteivel. A modell jelen állapotában 55 műtárgyat tartalmaz, ebből 9 duzzasztómű, a fennmaradó 46 pedig közúti vagy vasúti híd. A duzzasztóművek az alábbiak:

- Túr nagy-bukó, Túr
- Túr kis-bukó, Túr
- Borzsovai bukó, Borzsa
- Tiszalöki vízlépcső (gáttábla, billenőtábla, vízerőtelep), Tisza
- Kiskörei vízlépcső (gáttábla, vízerőtelep, árapasztó), Tisza
- Békési duzzasztó, Kettős-Körös
- Békésszentandrás duzzasztó, Hármaskörös
- Körösladányi duzzasztó, Sebes-Körös
- Gyulai duzzasztó, Fehér-Körös

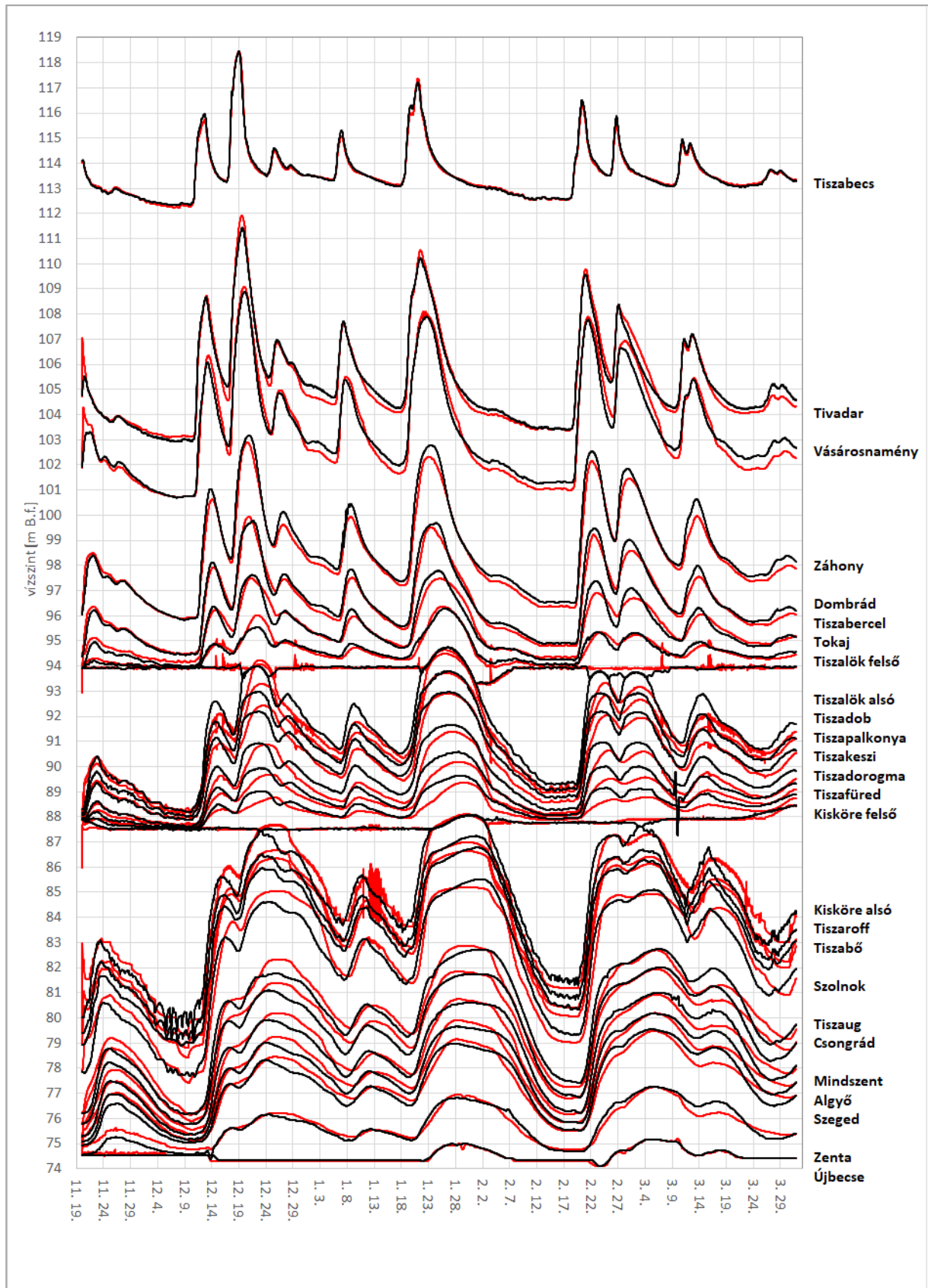
A műtárgyak hidraulikai leképezéséhez szükséges azok geometriájának ismerete és a vízszint-szabályozó műtárgyak esetében elengedhetetlen az üzemelési szabályzat is. Az összetett műtárgyakat is kezeli a modell, számítási szelvényeikben összegzi az együtthatók műtárgyképletekből származó értékeit és az egyes rész-műtárgyak (főelzárás, vízerőtelep, hajózsilip, árapasztó stb.) mozgása is összhangban történik. Mivel a számításhoz az egyenleteket nyílásonként írjuk fel, így a modelltől kinyerhető minden nyílás vízhozama és táblamozgása, így pontosan követhető a műtárgyak viselkedése. Műtárgyaink alapvetően felvízszintet tartanak, így a modell jelenleg ezt tudja kezelni, a paraméterezése a duzzasztási időszakok és a felvízszintek

megadásával történik, a táblaállások közvetlen definiálására egyelőre nincs lehetőség. Vízerőtelepek esetén a modell figyelembe veszi, ha adott esés alatt már nincs energiatermelés, esetleg árapasztó céllal a nyílások mégis üzembe állnak és azt is figyeli, hogy milyen esésnél tud az energiatermelés újra elindulni.

A modell a Vásárhelyi-terv továbbfejlesztése keretében épült árvízi szükségeltározókat jelenleg nem tartalmazza. Ezek figyelembe vétele a mindennapi operatív előrejelzés során nem szükséges, mivel a lefolyásra gyakorolt hatásuk csak üzembe állítás esetén jelentkezik. A modell alkalmas a tározók vízkivételi és visszaterelési szelvényeinek ki- és belépő vízhozamainak számítására, de a tározótér elöntése már nem az egydimenziós hidrodinamika feladatköre.

EREDMÉNYEK

Az 1D hidrodinamikai modell eredményeiből a 2022.11.20. és 2023.03.31. közötti vízszint idősorokat (5. ábra), valamint a mérésekkel való összehasonlítás statisztikai jellemzőit (3. táblázat) mutatjuk be. Ezek az RMSE (átlagos négyzetes hiba gyöke), RSR (a szórással normalizált átlagos négyzetes hiba gyöke), a hibaszórás, PBIAS (százalékos eltolódás), NSE (Nash-Sutcliffe hatékonyság), és NNSE (normalizált Nash-Sutcliffe hatékonyság) értékek. Az előrejelzések statisztikai értékelésének részletes bemutatása meghaladja e közlemény kereteit, ezért itt csak a legfontosabbat emeljük ki. Az RSR, mint az RMSE mért adatok szórással normalizált értéke jól mutatja a négyzetes középhiba mértékét az észlelt idősor változásához képest. Így egy duzzasztó felső állomásnál, ahol az idősor szinte állandó, mindössze néhány alkalommal van nagyobb vagy kisebb érték, a négyzetes középhiba alacsony, de a mért idősor szórása is alacsony, így az RSR jobban jellemzi a hibát, mint az RMSE. A PBIAS a felül- vagy alubecslés mutatószáma, míg az NSE, és a 0-1 értéktartományra normalizált NNSE a hidrológia egyik leggyakoribb hatékonysági mutatója.



5. ábra. Mért (fekete) és számított (piros) vízállás idősorok a főbb tiszai állomásokon 2022.11.20. és 2023.03.31. között
 Figure 5. Observed (black) and simulated water levels at the major gauging stations (20.11.2022 - 31.06.2023)

3. táblázat: Az 1 D hidrodinamikai modell hatékonysági mutatói
Table 3. Efficiency indicators of the 1D hydrodynamic model

Állomás	RMSE	RSR	Hibaszórás	PBIAS	NSE	NNSE
Tiszabecs	8,76	0,09	8,42	-0,00033	0,99	0,99
Tivadar	25,01	0,14	24,70	-0,00734	0,98	0,98
Vásárosnamény	33,58	0,18	33,43	0,000235	0,97	0,97
Záhony	29,57	0,17	21,97	0,003692	0,97	0,97
Dombrád	21,25	0,15	19,11	0,00037	0,98	0,98
Tiszabercel	22,29	0,22	22,05	-8,2E-05	0,95	0,95
Tokaj	14,00	0,27	13,87	0,000036	0,93	0,93
Tiszalök-felső	11,69	0,56	11,41	-5,5E-05	0,68	0,76
Tiszalök-alsó	41,80	0,24	33,34	0,001185	0,94	0,94
Tiszadob	29,14	0,19	29,13	0,00003	0,96	0,96
Tiszapalkonya	28,50	0,21	25,81	0,00039	0,96	0,96
Tiszakeszi	39,31	0,37	26,28	0,000847	0,86	0,88
Tiszadorogma	31,24	0,39	23,63	0,000423	0,85	0,87
Tiszafüred	25,27	0,47	18,30	0,000332	0,78	0,82
Kisköre felső	9,05	0,41	9,02	0,00001	0,84	0,86
Kisköre alsó	48,91	0,21	48,90	-1,7E-05	0,96	0,96
Tiszaroff	46,76	0,21	45,86	0,000242	0,96	0,96
Tiszabő	45,48	0,20	45,07	-0,00017	0,96	0,96
Szolnok	47,35	0,21	46,80	-0,0002	0,96	0,96
Tiszaug	38,89	0,20	38,88	0,000036	0,96	0,96
Csongrád	37,30	0,21	35,99	-0,0003	0,96	0,96
Mindszent	33,61	0,20	33,61	-1E-06	0,96	0,96
Algyó	31,69	0,22	31,48	-9,5E-05	0,95	0,95
Szeged	28,74	0,22	28,53	-9,5E-05	0,95	0,95
Zenta	20,56	0,26	20,44	-0,00006	0,93	0,94
Újbecse	4,76	0,20	4,75	0,000012	0,96	0,96
Törökbecse-felső	2,22	0,09	1,21	0,000044	0,99	0,99

A mellékvízfolyások eredményeit jelen közleményben nem tárgyaljuk, kalibrációjuk, és az országhatáron túli bővítésük jelenleg is folyamatban van.

DISZKUSSZIÓ

Kihívások és nehézségek

Bár a Tisza vízrendszere átlátható, a mederviszonyok többnyire ismertek, vízmércékkel és geometriai, valamint hidrológiai adatokkal kellően ellátott, ám hidrológiája mégis annyira komplex, hogy ilyen nagy kiterjedésű rendszer 1 dimenziós modellezése számos nehézséget rejt magában. A Tiszalöki és Kiskörei vízlépcsők meghatározó szerepet játszanak a Tisza hazai szakaszának vízjárásában. A műtárgyak leképezése hidraulikai összefüggésekkel egyértelmű feladat; a működtetésük (táblamozgatások stb.) által befolyásolva műtárgyon az a vízmennyiség megy át, ami oda megérkezik, és úgy, ahogy az alvízi viszonyok azt megengedik. Természetesen minden minden-

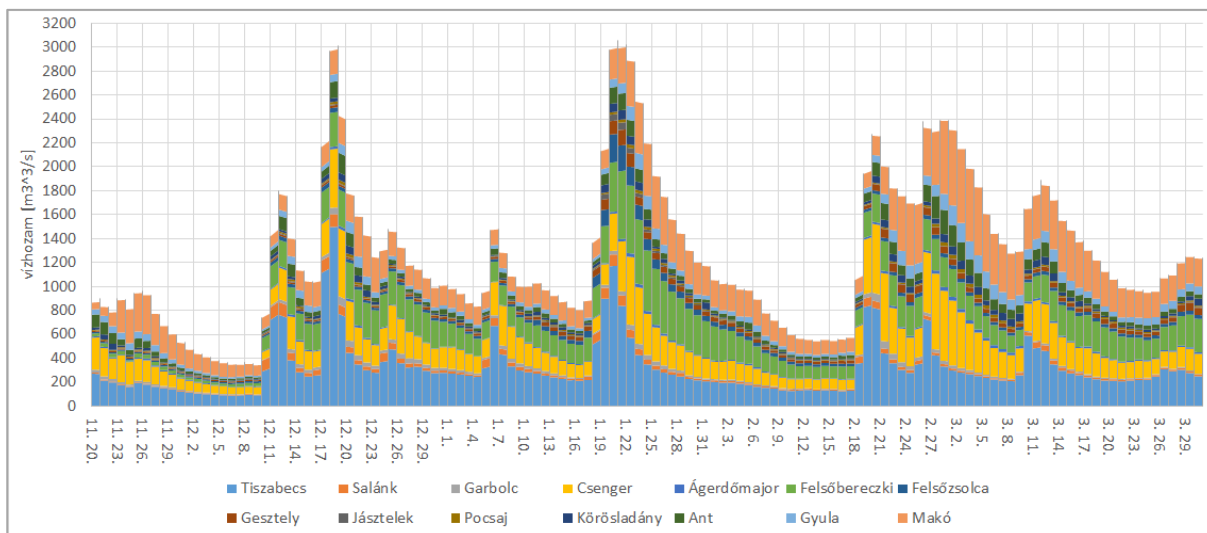
nel összefügg, például a zentai vízállásra hatással van akár egy rosszul modellezett szakasz a Bodrogon.

Így a modell felépítését az alábbi 4 nagy lépésre bontottuk:

1. lépés: a modell felépítése és kalibrációja Tiszabecstől a Tiszalöki vízlépcsőig,
2. lépés: a modell kiegészítése Kisköréig, a Tiszalök és Kisköre közötti szakasz kalibrációja,
3. lépés: a modell kiegészítése Újbecséig, a Kisköre alatti szakasz kalibrációja,
4. lépés: a teljes modell finomhangolása.

Ebben a felosztásban kellő figyelem jutott az egyes szakaszokon lejátszódó részfolyamatokra, és alaposan kiismerhető volt a modell eredmények és az észlelések közötti összefüggések.

A modell felső peremfeltételein beérkező vízhozamokat a 6. ábra szemlélteti.

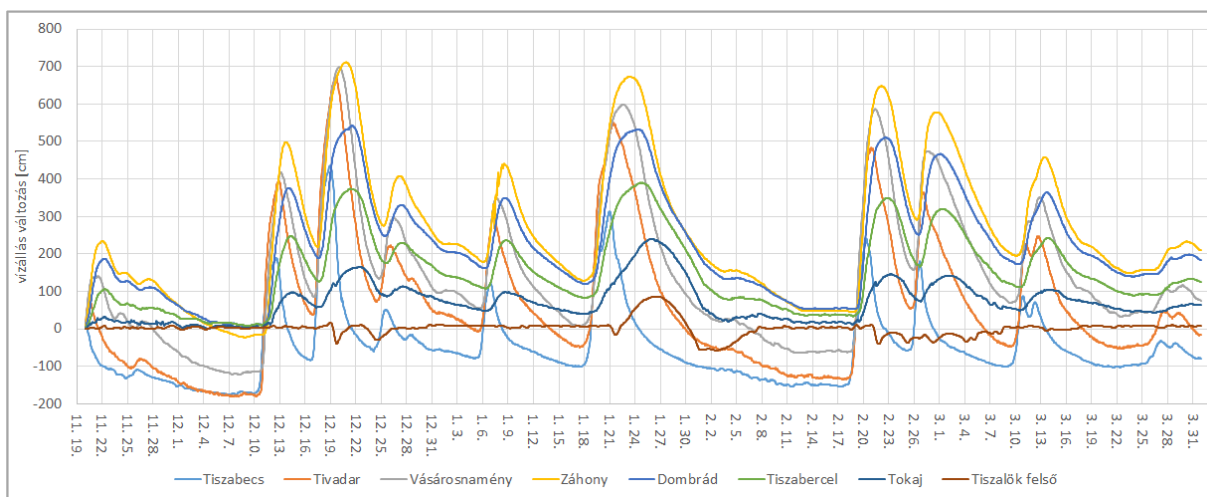


6. ábra. Beérkező vízhozamok a felső peremfelételeken 2022.11.20. és 2023.03.31. között
 Figure 6. Inflow at the upper boundaries (20.11.2022-31.03.2023)

Ha megnézzük a vízállások alakulását Tiszabecstől Tiszalök felsőig (7. ábra), kivonva minden értékből a kezdő vízállást, akkor végig tudjuk követni, hogyan transzformálódnak az árhullámok térben és időben. Az árhullámok legnagyobb amplitúdója Tivadar, Vásárosnamény és Záhony térségében rajzolódik ki. A 2022. decemberi vizsgált időszakban például 437 cm-es tiszabecsi növekményhez, Tivadarnál 672 cm, Vásárosnaménynál 699 cm, Záhony-nál 712 cm tartozik. Záhony alatt egy erőteljes ellapulás indul meg, Dombrádnál már nincs meg a hegyes tetőzés, az árhullámok csúcsa lekerekedik, és ez a hatás tovább erősödik Tiszalök felé haladva. Az árhullám csúcsának deformációja már kis mértékben Záhony-nál is megfigyelhető. Másik fontos változás az egyes csúcsokat összehasonlítva, hogy míg Dombrádnál a decemberi árhullám magasabban tetőzött, mint a januári, addig Tiszabercelnél már a januári

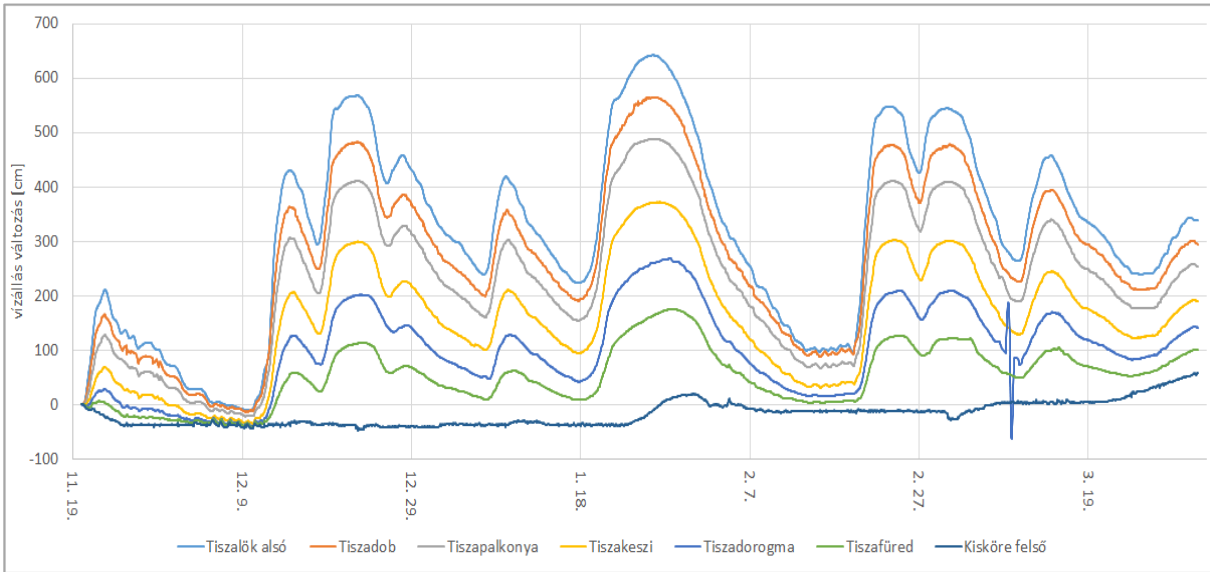
kicsit magasabban, Tokajnál pedig a januári jóval magasabban. Ennek oka, hogy a Bodrog decemberben 300 m³/s körüli csúcs vízhozamot, januárban pedig 580 m³/s körüli tetőző vízhozamot hozott.

Tiszalök felett a Szamos és a Bodrog vízhozama számottevő, míg a többi mellékfolyó hozama a Tiszához viszonyítva elenyésző mértékű. Ez indokolja a Záhonyig emelkedő vízállás növekményeket. A Záhony alatti erőteljes ellapulás pedig egyrészt a Tiszalöki vízlépcső visszaduzzasztó hatásának eredménye, ami a hossz-szelvényen is látható, másrészt pedig a hullámtéren lejátszódó folyamatok következménye. A Bodrogon érkező nagyobb januári árhullám így Tokajnál már meg is fordítja az arányokat és ennek a visszaduzzasztó hatása Tokaj felett is megmutatkozik. Hasonló a helyzet Csongrádnál és Szegednél, a Hármaskörös és a Maros torkolatánál is.

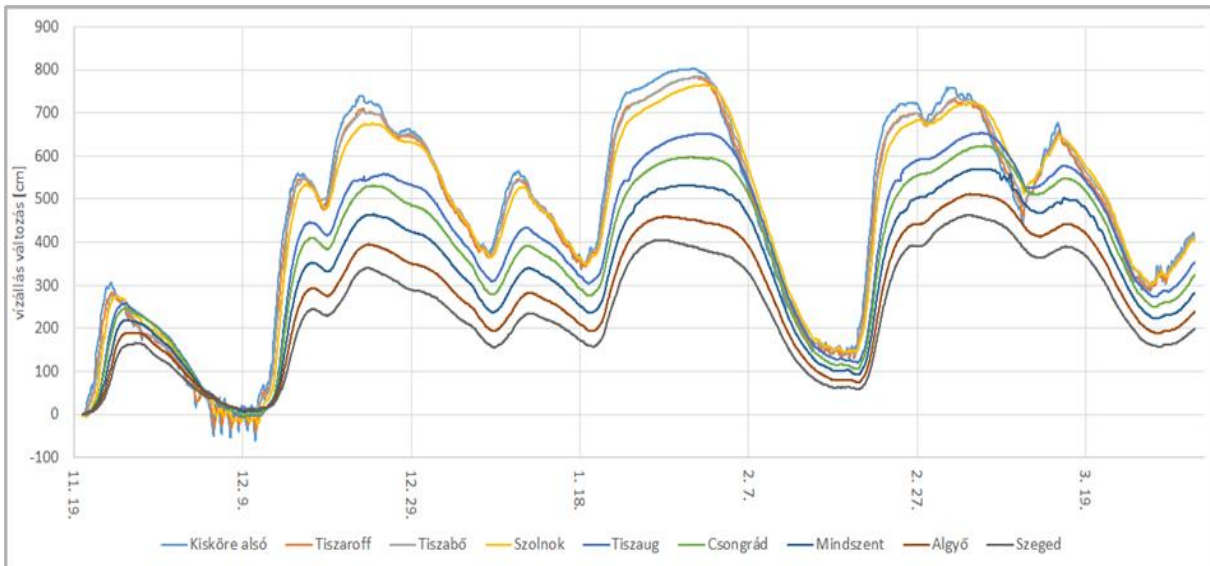


7. ábra. Vízállások változása Tiszabecstől Tiszalök felsőig 2022.11.20. és 2023.03.31. között a kezdőértékhez viszonyítva
 Figure 7. Water level changes between Tiszabecs and Tiszalök relative to the first value (20.11.2022-31.03.2023)

A Tiszalök és Kisköre közötti, valamint a Kisköre alatti vízszintváltozásokat a 8. ábra és a 9. ábra szemlélteti:



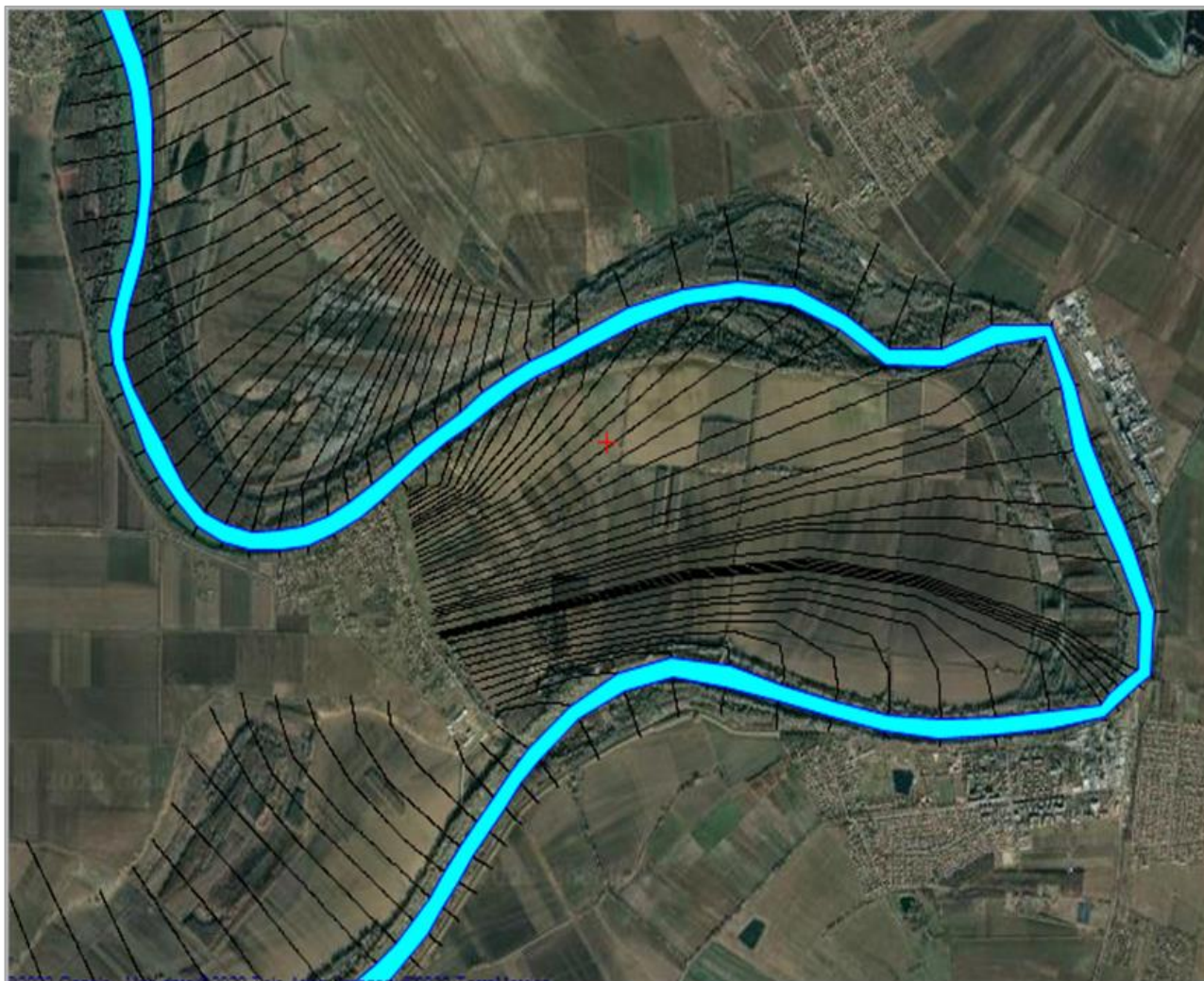
8. ábra. Vízállások változása Tiszalök alsó és Kisköre felső között 2022.11.20. és 2023.03.31. között a kezdőértékhez viszonyítva
Figure 8. Water level changes between Tiszalök and Kisköre relative to the starting value (20.11.2022-31.03.2023)



9. ábra: Vízállások változása Kisköre és Szeged között 2022.11.20. és 2023.03.31. között a kezdőértékhez viszonyítva
Figure 9. Water level changes between Kisköre and Szeged relative to the starting value (20.11.2022-31.03.2023)

Egy másik jelentős hatás, ami magyarázatot ad az árhullámok ellapulására, az a hidak jelenléte. A hidak különféleképpen hatnak az árhullámok levonulására annak függvényében, hogy meder-, hullámtéri pillérek milyen méretűek, kialakításuk, mennyi van belőlük, és a hídfők kialakítása milyen mértékben szűkíti a kereszt-szelvényt. Néhol szélesebb hullámtér esetében az út egy szakaszon töltésen megy, amin nem minden esetben vannak ártéri nyílások. Ezt a Saint Venant egyenletek le tudják írni, de olyan sűrű kereszt-szelvény kiosztást igényelne, ami ezeket a geometriai változásokat jól jellemezné. Ez lokálisan magas CFL (Courant- Friedrichs-

Lewy), Courant-számot eredményezne, így nem tenné lehetővé nagy időlépés használatát. A modellezési gyakorlatban elterjedt a hidak duzzasztásának leírása vízszint szabályozó műtárgyakhoz hasonló hidraulikai összefüggésekkel, így megtartható a nagy időlépcső és szimulálható a hidak hatása is. Ezen elv mentén a hidakat a zilip képlet segítségével írtuk le, nyílásaik alsó része maga a meder, egészen a hídfők által behatárolt szélességig. Ez tovább bővíthető az ártéri nyílások szelvényterületével. A képletben a kontrakciós tényező a mederfenékhez közeledve nő, így kisvízes időben a hidaknak nincs visszaduzzasztó hatása.



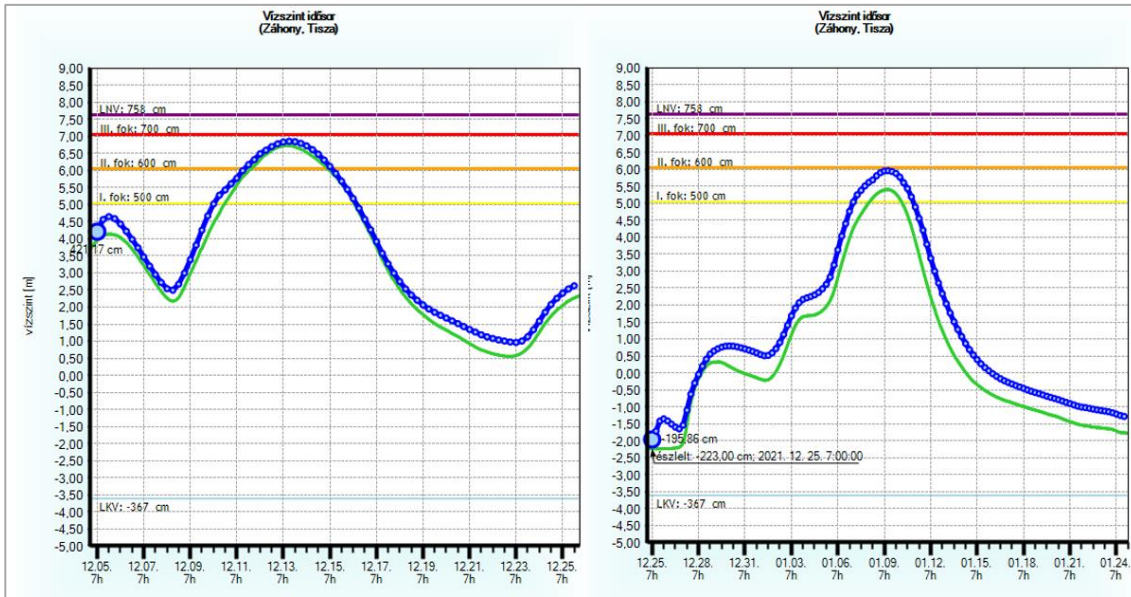
10. ábra. Folyókanyarulat Martfűnél (fekete vonal: keresztmetszvények, kék felület: számított vízfelszín)
 Figure 10. A meandering reach at Martfű (black line: cross-section, blue surface: simulated water level)

Több helyen az 1D megközelítés jelentős elhanyagolásokat jelent, mert a Tisza helyenként meanderező medre (10. ábra), kiszélesedő, majd összeszűkülő nagyvízi szelvénye, továbbá a hullámtér jellegzetességei, a területhasználati viszonyai nem írhatóak le egy egyszerű hosszirányú hidrodinamikai modellel. Ezek hidraulikai leképezését több módszer segítségével valósítottuk meg:

- A keresztmetszvények automatikus vágása a partélek mentén, úgy hogy a hullámtéri részek csak a partélfeltti vízszint esetén lépnek be a vízszállításba. Ezt a megköztést helyenként elengedtük, így a hullámtér hamarabb részt vesz az árhullámok levezetésében.
- A számítási keresztmetszvények távolsága, az alap-egyenleteink ∂x változója (1. és 2. egyenletek), alap esetben a szomszédos szelvényekhez tartozó szelvény-számokból következik. Azonban meanderező folyó

esetén a nagyvízi sodorvonal rövidebb, így az árhullámok csúcsa gyorsabban halad. Ezért a ∂x távolságot a vízszint függvényeként kezeltük, alapértékétől egészen a két szomszédos szelvény legközelebbi pontjainak távolságáig terjedően.

Az expanziós és kontrakciós veszteségek tényezője (K_{ec}) (5. egyenletben) szintén jelentősen befolyásolja az árhullámok haladási sebességét. Próbaszámítások után szűkületeknél 0,05, bővületeknél -0,25 értéket használtunk. A Tisza esetében sok helyütt számottevő medersüllyedés figyelhető meg. A 2010. decemberi, a három közül a legnagyobb árhullámra végzett kalibráció eredménye így jelentős javításra szorult. A modell a 2021. decemberi időszakban Záhonyánál a vízállásokat szinte konstans módon 65 cm-rel túlbecsülte (11. ábra).



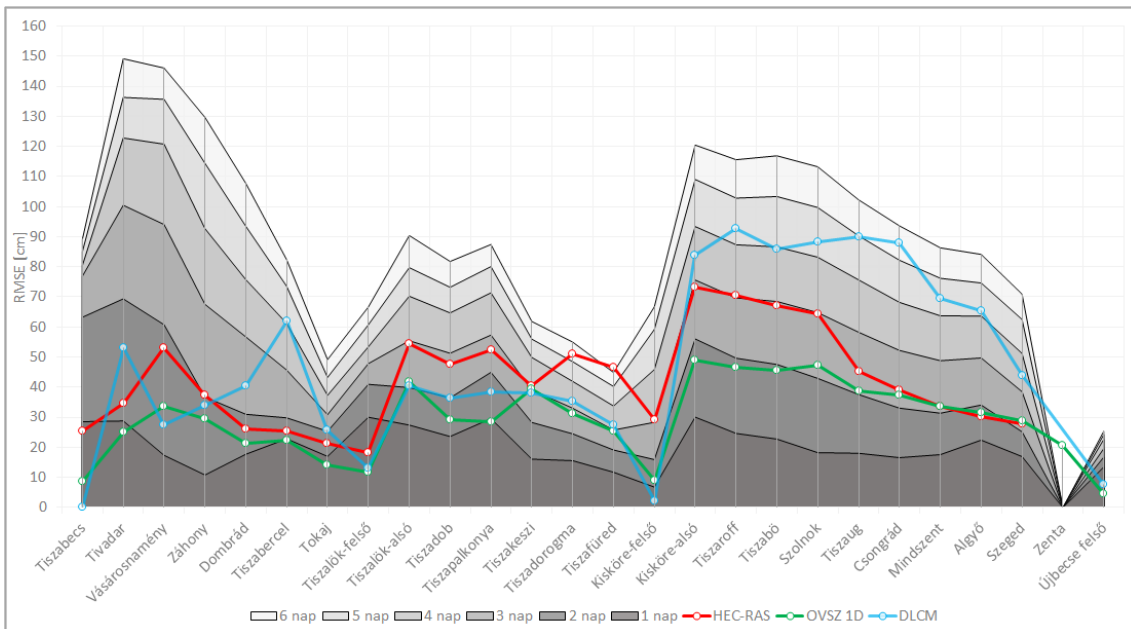
11. ábra. A 2010. decemberi árhullám kalibrációs eredménye Záhonyánál (balra), ugyanezzel a modellel a 2021. decemberi árhullám (jobbra) Záhonyánál (kék – OVSZ 1D, zöld – észlelt)

Figure 11. Calibration results at Záhony in 2010 (left), and the same model in 2021 (right) (blue – OVSZ 1D, green – observed)

Összehasonlítás az OLSER és a HEC-RAS eredményeivel

A modell eredményeit összevetettük a HEC-RAS modell és az OLSER eredményeivel (12. ábra). A HEC-RAS modellt – melyet a KÖTIVIZIG bocsátotta rendelkezésünkre – változtatás nélkül, az adott időszakra vonatkozó peremfeltételekkel, valamint tiszalóki és kiskörei üzemrendekkel futtattuk. Az OLSER-ből kétféle adatot vettünk ki, az egyik az adott időpontra kiadott előrejelzések négyzetes középhibái 1-6 napos időelőjellel, a másik pedig csak az OLSER árhullám-transzformációs moduljával, a

diszkrét lineáris kaszkádmoddellel (DLCM) futtatott szimuláció eredménye a vizsgált szakaszon. A 12. ábrán adtuk meg a háromféle árhullám-transzformációs modell eredményeinek RMSE alapú összehasonlítását (kék – DLCM, zöld – OVSZ 1D, piros – HEC-RAS) a vízmércékre vonatkozóan, valamint szürke sávokkal az egyre növekvő időelőjellel kiadott előrejelzéseket. Ez jól szemlélteti, hogy előrejelzési helyzetben a meteorológiai előrejelzések, az észlelések asszimilációja, és a hibakorrekció milyen mértékben határozzák meg az előrejelzett vízállásokat, azaz mennyire eltér az észlelések alapján lefutott DLCM eredményeitől.

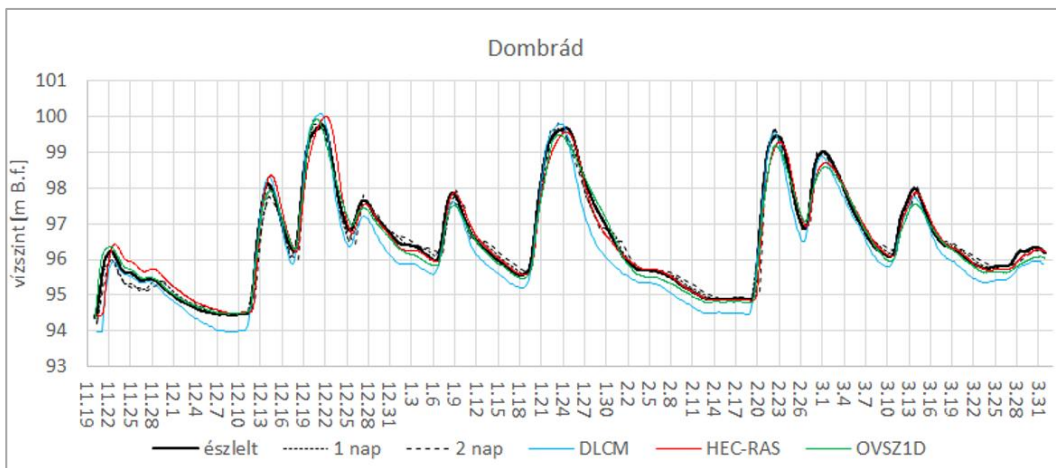


12. ábra. Az OLSER által számított előrejelzések, DLCM, HEC-RAS és OVSZ 1D modelledmények négyzetes középhibája 2022.11.20. és 2023.03.31. között

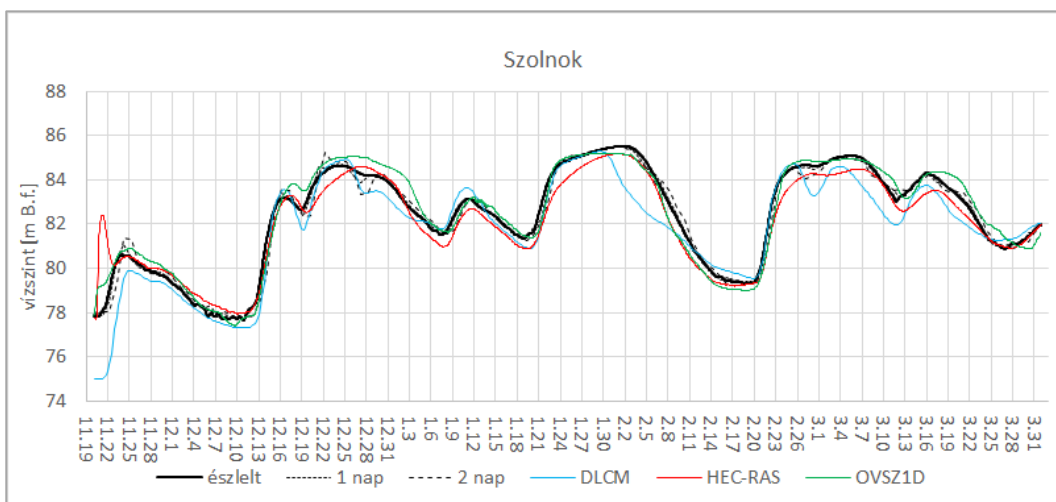
Figure 12. The root mean square error of OLSER-calculated forecasts, DLCM, HEC-RAS and OVSZ 1D model results (20.11.2022-31.03.2023)

Az összegző kiértékelés mellett néhány állomás: Domb-
 rád (13. ábra), Szolnok (14. ábra), Szeged (15. ábra) víz-
 szint idősorát külön is ábráztuk, hogy érzékelhető legyen
 az a különbség, amit az egyes mutatók számszerűsítenek.
 Az alábbi ábrákon például látható, hogy a DLCM az apadást
 valamennyi esetben intenzívebben szimulálja. Ennek oka a

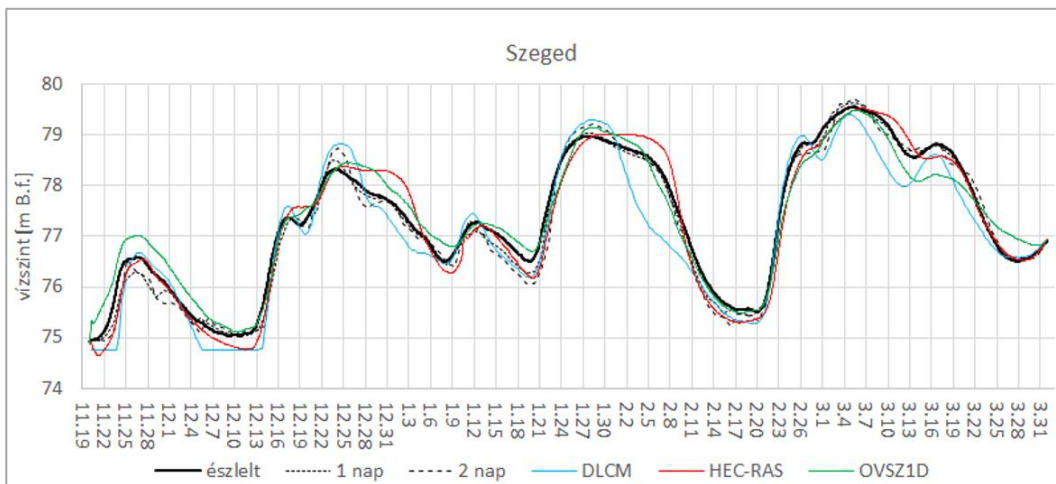
permanens Q-h kapcsolat, ami nem képes az áradó és apadó
 ágak közötti eséskülönbség figyelembe vételére. Szintén
 hiba a DLCM esetén a dombrádi vízállások alulbecslése. A
 HEC-RAS esetében a nagyobb árhullámok tetőzése már
 Dombrádnál késik, ami Szolnokig tovább fokozódik, Sze-
 gednél pedig jelentős eltérések vannak a mért értékektől.



13. ábra. Észlelt és számított vízszintek a Tiszán Dombrádnál 2022.11.20. és 2023.03.31. között
 Figure 13. Observed and simulated water levels at Dombrád (20.11.2022-31.03.2023)



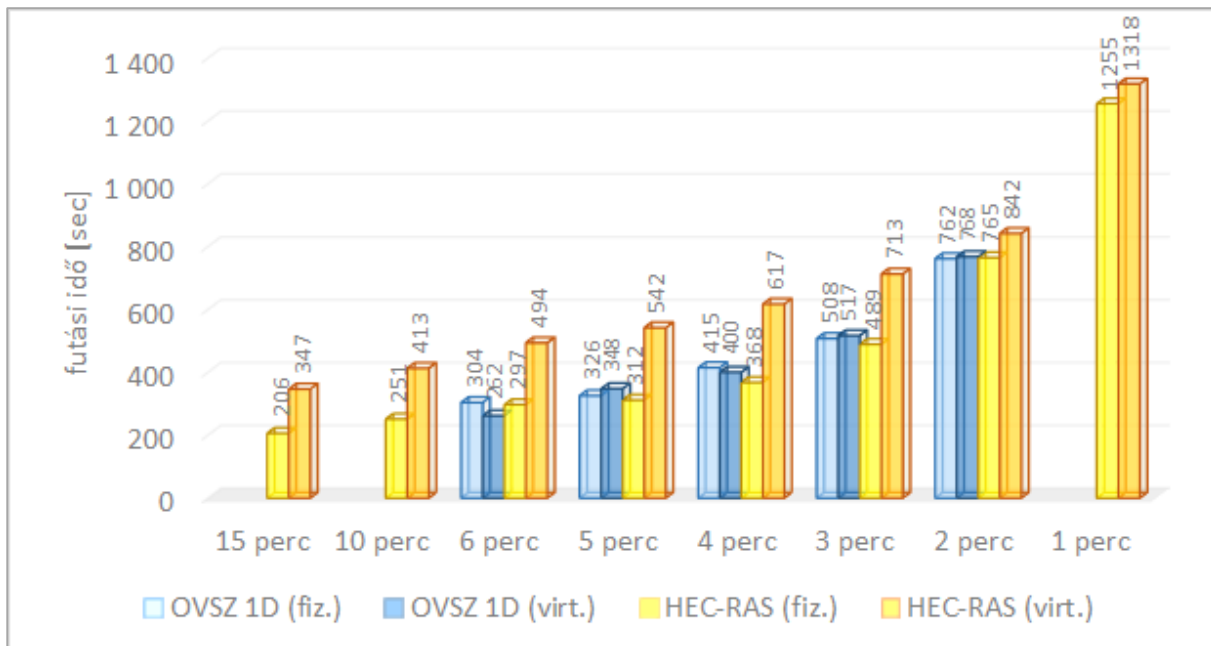
14. ábra. Észlelt és számított vízszintek a Tiszán Szolnoknál 2022.11.20. és 2023.03.31. között
 Figure 14. Observed and simulated water levels at Szolnok (Tisza) (20.11.2022-31.03.2023)



15. ábra. Észlelt és számított vízszintek a Tiszán Szegednél 2022.11.20. és 2023.03.31. között
 Figure 15. Observed and simulated water levels at Szeged (Tisza) (20.11.2022-31.03.2023)

A két 1D modellnél a szimuláció sebességében is különbség van (16. ábra). Azonos számítógépen, különböző

időlépcsőkkel ugyanarra az időszakra és kiterjedésre futtatott szimulációk esetén a futási idők az alábbiak:



16. ábra. A szimuláció ideje különböző időlépcsők mellett a HEC-RAS és OVSZ 1D modellel virtuális és fizikai környezetben
Figure 16. The time of simulation with different time steps with HEC-RAS and OVSZ 1D models in virtual and physical environments

A szimulációt virtuális környezetben végeztük (CPU: Intel Xeon Gold 5218R @ 2.10 GHz 16 mag, Memória: 16,0 GB, Merevlemez SCSI Virtual Disk), ami a HEC-RAS számára nem tűnt ideális választásnak. A fizikai gépen végzett (CPU: Intel i7-4790 @ 3.60GHz, Memória: 16,0 GB DDR3, Merevlemez: Samsung SSD 860 EVO 250GB) szimulációk jelentős gyorsulást mutatnak, ami magyarázható az egy-egy processzormag számítási teljesítményének különbségével és az SSD nagyobb írási sebességével. A HEC-RAS a linearizált alapegyenletek mátrixos alakjának ritka, sávos együttható mátrixát tömöríti, egy ún. skyline tárolási sémát használ (Bathe és Wilson 1976), ami csökkenti a szimuláció sebességét, de nem teszi lehetővé az algoritmus párhuzamosítását.

A DLCM az analitikus megoldás miatt azonnali eredményt jelent, így ebben az összehasonlításban nem szerepel. A HEC-RAS a szimuláció során csak a vízszint és vízhozam eredményeket menti, a továbbiakat egy Post Processor végzi, ami néhány másodperces többletet jelent a szimuláció végén. Az OVSZ 1D modell az együttható mátrix elemeit egy párhuzamos ciklusban, több processzormagot kihasználva tölti fel, hiszen ezek az értékek függetlenek egymástól, de nagyszámú művelet elvégzését igénylik. A gyors szimuláció másik feltétele a lehető legkevesebb számú művelet végzése, ezt a hidraulikai jellemzők minél jobb előkészítésével érhetjük el a keresztmetszvények feldolgozása során. A számítás sebességét viszont nagymértékben lassítják a vízszint-szabályozó műtárgyak, mert ezek algoritmusuk több feltételes elágazást tartalmaz, ami ugyanennyi kifejezés kiértékelését jelenti, ráadásul a modell a szimulált üzemelés adatait, mint részeredményeket is eltárolja.

ÖSSZEFOGLALÁS

A Tisza 1D hidrodinamikai modellezése feladat során továbbfejlesztettük a már Dunára kiépített 1D hidrodinamikai modellt, hogy alkalmas legyen a Tisza vízrendszerének modellezésére. A modellt kalibráltuk egy-egy 2010., 2021. árhullám, valamint egy hosszabb 2022-23-as időszak alapján. A modell átlagos négyzetes középhibája a vizsgált időszakban kisebb, mint a HEC-RAS modellel, és a DLCM-mel végzett számítások átlagos RMSE értéke. A folyamatos fejlesztés és a paraméterek finomhangolása elengedhetetlen, ahogy a keresztmetszvény adatok rendszeres felülvizsgálata is fontos követelménye a hosszú távú megbízható modellezésnek. A szimuláció sebessége és stabilitása is kielégítő, alkalmas arra, hogy az OLSER rendszer részeként a jövőben támogassa az árhullám-transzformációs számításokat és hozzájáruljon a pontosabb előrejelzésekhez.

IRODALOMJEGYZÉK

Abbott, M.B. (1979). Computational Hydraulics. Pittman Publishing Limited, Boston. London, Melbourne.

Abbott, M.B., Basco, D.R. (1989). Computational Fluid Dynamics. Longman Scientific & Technical, Harlow.

Bathe, K.J., Wilson, E.L. (1976). Numerical Methods in Finite Element Analysis. Prentice Hall, Upper Saddle River.

Cammalleri C., Naumann G., Mentaschi L., Formetta, G.(a), Forzieri, G., Gosling, S.(b), Bisselink, B., De Roo, A., Feyen, L. (2020). Global warming and drought impacts in the EU, EUR 29956 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-12947-9. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/597045>

Chang, F.J., Chang, L.C., Chen, J.F. (2023). Artificial Intelligence Techniques in Hydrology and Water Resources Management. *Water* 2023, 15, 1846. <https://doi.org/10.3390/w15101846>

Cunge, J.A., Holly, F.M., Verwey, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. London: Pitman.

Di Nunno, F., de Marinis, G., Granata, F. (2023). Short-term forecasts of streamflow in the UK based on a novel hybrid artificial intelligence algorithm. *Sci Rep* 13, 7036 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34316-3>

Fread, D.L., Lewis, J.M. (1998). NWS FLDWAV MODEL. NOAA, Hydrologic Research Laboratory, Office of Hydrology.

Kalinin, G.P., Milyukov, P.I. (1957). Raschete neustanovivshego- sya dvizheniya vody v otkrytykh ruslakh. On the computation of un- steady flow in open channels. *Met. i Gydrologia Zhurnal*, 10, pp.10-18. Leningrad.

Lhotka, O., Trnka, M., Kyselý, J., Markonis, Y., Balek, J., Mozny, M. (2020). Atmospheric Circulation as a Factor Contributing to Increasing Drought Severity in Central Europe. *JGR Atmospheres*, 18, 125. <https://doi.org/10.1029/2019JD032269>

Liptay Z.Á., Gauzer, B. (2021). Operational river ice and water temperature forecasting on the Hungarian Danube reach, In: *Science and practice for an uncertain future*. <https://doi.org/10.3311/FloodRisk2020.17.11>

Liptay Z.Á. (2022). Neurohydrological prediction of water temperature and runoff time series. *Acta Hydrologica Slovaca*. 23. pp. 190-196. <https://doi.org/10.31577/ahs-2022-0023.02.0021>

Nash, J.E. (1960). A unit hydrograph study, with particular reference to british catchments. *Hydraulics Research Station, Department of Scientific and Industrial Research*, p. 6433. <https://doi.org/10.1680/iicep.1960.11649>

Nearing, G., Cohen, D., Dube, V., Gauch, M., Gilon, O., Harrigan, S., Hassidim, A., Kratzert, F., Metzger, A., Nevo, S., Pappenberger, F., Prudhomme, C., Shalev, G., Shenzi, S., Tekalign, T., Weitzner, D., Matias, Y. (2023). AI Increases Global Access to Reliable Flood Forecasts. *Environmental Science, Computer Science, Engineering, arXiv.org* 30 July 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.16104>

Preissmann, A. (1961). Propagation des intumescences dans les canaux et rivières. First Congress of the French Association for Computation, Grenoble, pp. 433-442.

Stagge, J.H., Kingston, D.G., Tallaksen, L.M., Hannah, D.M. (2017). Observed drought indices show increasing divergence across Europe. *Sci Rep* 7, 14045. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14283-2>

Szilágyi J., Laurinyecz P. (2014). Accounting for Backwater Effects in Flow Routing by the Discrete Linear Cascade Model. *Journal of Hydrologic Engineering*. 19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000771](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000771)

Szilágyi J., Szöllősi-Nagy A. (2008). Streamflow forecasting using a physically based state-space approach to flow routing. Budapest, Budapest University of Technology and Economics.

Szöllősi-Nagy A. (1982). The discretization of the continuous linear cascade by means of state-space analysis. *J. Hydrol.*, 58. pp. 223-236. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90036-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90036-1)

A SZERZŐ



LIPTAY ZOLTÁN ÁRPÁD okleveles infrastruktúra-építőmérnök, az Országos Vízellátó Szolgálat előrejelzője, a Nemzeti Községi Egyetem Víztechnológiai Kar Területi Vízgazdálkodási Tanszékének adjunktusa, az MTA Műszaki Tudományok Osztályának köztestületi tagja, a Hidrológiai Társaság Hidraulikai és Műszaki Hidrológiai Szakosztályának vezetőségi tagja. Kutatási területe a hidrológiai előrejelzés, a numerikus hidrodinamikai és hidrológiai modellezés, valamint a mesterséges intelligencia hidrológiai célú felhasználási lehetőségei. A Hidrológia Társaság tagja 2009 óta.